黄河源区气候水文和植被覆盖变化及面临问题的对策建议

郑子彦[1]　吕美霞[1]　马柱国[1,2*]

1 中国科学院大气物理研究所 中国科学院东亚区域气候-环境重点实验室 北京 100029

2 中国科学院大学 北京 100049

摘要　黄河源区是黄河流域最重要的水源地和产流区，贡献了超过全流域37%的产流量，对流域中下游地区的水资源安全、粮食生产和生态环境有决定性的意义。明晰黄河源区近60年来的气候水文和近30年来的植被覆盖特别是草地退化的变化特征，不仅是深入理解黄河源区水文循环机理的前提，也是准确把握源区及中下游水资源状况和生态环境的关键，更是贯彻习近平总书记“黄河流域生态保护和高质量发展”要求的核心问题。从气候角度看，黄河源区自1951年以来经历了显著的暖湿化过程，20世纪90年代有所回落。但从2000年以来，气温和降水以更快的速度增大，进而引发了冰川积雪消融加剧、蒸散发增加和冻土层退缩等一系列后果。然而，由于各个过程中水分损耗的加剧以及人类活动的影响，这种增湿并不能转换为有效的水资源，黄河源区的观测和天然河川径流量均呈现出减少的趋势。而不断退化的草地则使得区域水分涵养能力不断降低，生态环境不断恶化。面对黄河源区严峻的水资源和生态环境挑战，除了继续深入研究黄河源区水文循环机理外，建议应做到：（1）将生态环境保护放在首位；（2）水资源的有序开发利用；（3）社会生产与自然环境的和谐共存；（4）从战略高度贯彻实施有序适应气候变化。

关键词　黄河源区，气候变化，水资源，植被覆盖，对策建议

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.20191230002

黄河源区位于青藏高原东北部，包括黄河干流唐乃亥水文站上游约 1.22×10^5 km^2 的集水区，占黄河流域总面积的 16%（图 1）。黄河源区年径流量为 2.002×10^{10} m^3，占全流域年总径流量（利津站）的 37%①。黄河源区是黄河流域最重要的产流区、水源区及生态涵养地，素有“黄河水塔”之称，对流域中下

*通讯作者

资助项目：国家自然科学基金（41530532、41605085、41705072）
修改稿收到日期：2020年1月7日

① 依据黄河流域 1956—2016 年天然径流量计算。

游地区和我国北方的农业生产、用水安全、生态环境保护和可持续发展具有举足轻重的意义。在全球气候变化和日趋频繁的人类活动影响下，黄河源区的区域气候、水分循环特征以及植被覆盖条件在近年来都发生了显著的变化[1]，进而可以对中下游地区的水资源安全、生态环境保护与区域可持续发展产生重大而深刻的影响。

2019年9月18日，习近平总书记在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话中明确指出，黄河流域是我国重要的生态屏障和经济地带，也是打赢脱贫攻坚战的重要区域，在我国经济社会发展和生态安全方面具有十分重要的地位；保护黄河是事关中华民族伟大复兴的千秋大计。尽管黄河治理在新中国成立以来取得了巨大的成就，但依然存在一些突出的困难和问题。必须通过共同抓好大保护，协同推进大治理，着力加强生态保护治理等手段，方可保障黄河长治久安、促进全流域高质量发展、改善人民群众生活、保护传承弘扬黄河文化，让黄河成为造福人民的幸福河[2]。要实现这一长远的战略目标，必须明晰黄河源区近30—50年，尤其是进入21世纪以来的气候水文变化特征，并深入分析和总结源区植被覆盖变化的特点，从而厘清黄河源区的水文循环规律及机理，最终为有效应对黄河源区及全流域所面临气候变暖、水资源短缺和生态恶化等问题提供科学依据和对策建议，并为有序适应气候变化提供理论基础。这不仅是当前备受关注的气候学和水文学前沿科学问题，也是水资源科学管理、生态环境保护和区域可持续发展的社会热点问题，更是准确把握当前黄河源区面临的主要挑战、实现黄河流域生态保护和高质量发展的最基本前提和关键。

本文综合回顾了现有针对黄河源区气候水文和植被覆盖变化的研究，并基于站点观测、格点融合观测、陆面同化及卫星遥感等多源数据，对黄河源区的气温、降水、蒸散发、河川径流量和陆地水储量等主要水文气候因子自20世纪50年代以来的变化趋势进行了统计分析；并利用高分辨率土地利用数据库分析

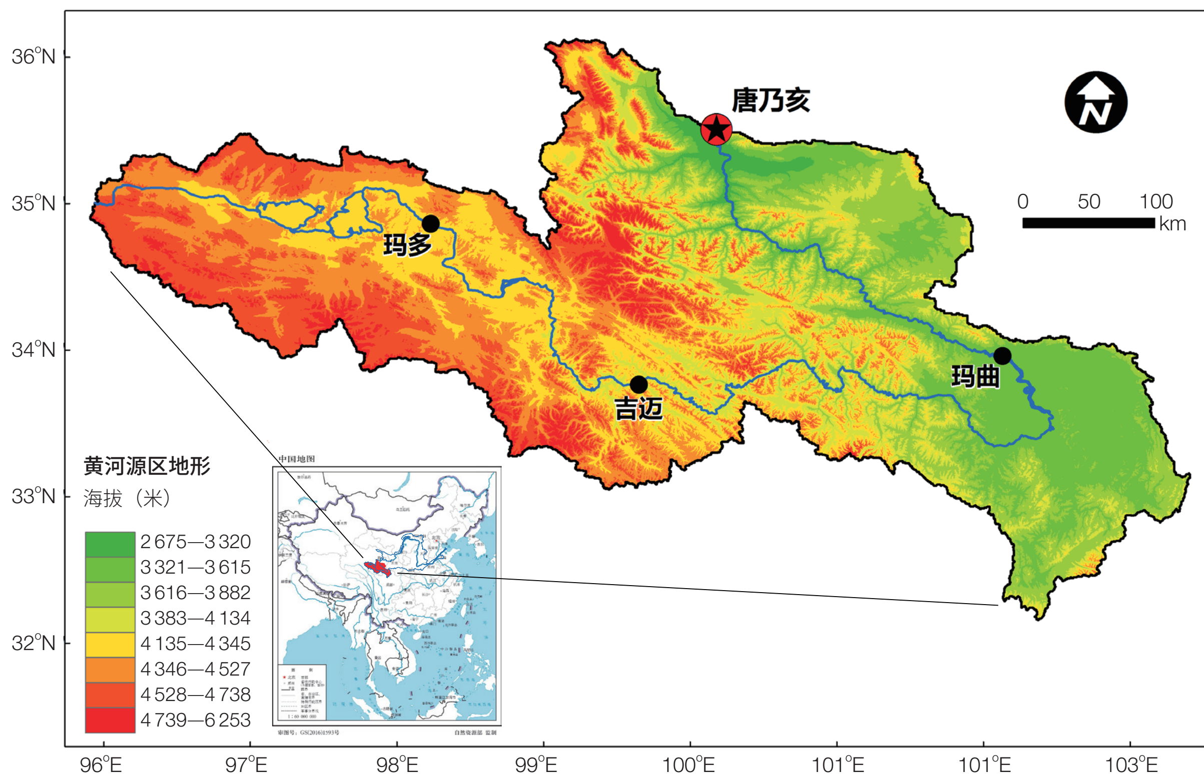


图1　黄河源区基本概况示意图

了黄河源区草地退化的特征；最后，基于上述结果，针对黄河源区当前所面临的主要问题给出了思考和对策建议。

1 黄河源区气候与水分循环特征的变化

黄河源区地处青藏高原和黄土高原的“干旱-半干旱”过渡地带，呈典型的大陆性高寒气候，年均降水量约 487.9 mm（1956—2016 年）。源区流域内地形地貌以山地、丘陵和盆地为主，土地覆盖以草地、灌木和裸土为主，生态环境十分脆弱。由于地处东亚季风的边缘地带，西太平洋副高的强度和位置变化可导致东南暖湿气流对源区水分的补充有很大的不确定性，致使源区降水在年际和季节尺度上的振荡较为明显，这是黄河中下游历史上旱涝交替剧烈、干旱和洪水灾害频发的主要原因。因此，黄河源区的地理位置和地形地貌特点，决定了该地区对气候的变化极其敏感。近 60 年来，在气候变化影响下，黄河源区的降水、气温和径流等关键气候水文因子都发生了很大的变化[3-5]。从 CRU（Climatic Research Unit）的格点融合观测资料（图 2）可以看出，黄河源区自 20 世纪 50 年代以来降水总体呈现出不断增多的态势，其长期趋势达到 7.28 mm/10 yr（P<0.01）。其中，1951—2000 年，黄河源降水变化非常平稳，仅以 3.76 mm/10 yr 不显著的趋势呈微弱的增长；但自 2001 年之后，降水量以 3.22 mm/yr（P<0.1）的速度迅猛增多，几乎是 1951—2000 年增速的 10 倍。可以说，黄河源区增多的降水是改善当前及未来源区甚至整个黄河流域水资源状况的基本先决条件。然而，前文已经指出，黄河流域的地理气候特点使得降水的年内分配集中于汛期（每年6—9月）且年际变化剧烈，因此如何合理、有效地通过水资源的调蓄来进行旱涝的防治仍然是一个极大的挑战。从降水的年内分配变化来看，黄河源区的降水集中指数自 20 世纪 60 年代以来呈现出减小的趋势，也就是说降水趋向于更均匀的年内分配，这对于潜在蒸散发能力较大且处于升温背景的西北干旱-半干旱区来说，增加的降水将有相当部分被损耗于额外的蒸散发。因此，降水量的增加并不意味着可利用水资源量的增多，更不代表水资源状况的最终改善。黄河源区增多的降水是否有可能、有条件转化为有效的、可利用的水资源，尚需在未来进一步严谨和全方位地研究和论证。

在全球变暖的影响下，从 CRU 气温资料可以看出，黄河源区自 20 世纪 50 年代至今表现出了显著的升温趋势，约为 0.07℃/10 yr（P<0.01）。气温升高对水文循环最主要的影响体现在 3个方面：区域蒸散发（evapotranspiration，ET）增强、冰川融雪增多和冻土层退化。

（1）作为区域水循环的重要因子，ET受温度的影响最为直接。自 1951 年以来，黄河源区的潜在蒸散发呈显著增加趋势，达到 2.29 mm/10 yr（P<0.05）。自 2000 年之后，在气候变暖、升温加速的作用下，黄河源区 ET 的增加相对于 1951—2000 年更加明显，高达 6.01 mm/10 yr。在我国西北内陆地区，区域蒸散发是水储量的重要损耗部分。也就是说，在进入 21 世纪以来，黄河源区的水分正面临着由于 ET 迅速增大而加剧损耗的严峻局面。尽管从区域水储量的角度来看，降水的增速快于 ET，降水与 ET 之差依然显现出增大的趋势，但由于 2000 年之后无论气温还是 ET 都有快速增加的趋势，可以预见，在未来因升温导致的 ET 损耗依然将会是黄河源区及中下游地区水资源状况改善的严重制约因素。

（2）积雪和冰川的消融是气温升高影响黄河源区水资源的重要表现之一。积雪和冰川是影响高寒山区水循环的重要因素，也是主要淡水水源之一。高寒山区的冰川对河川径流有重要的调节作用，同时扮演着水汽源和汇的双重角色。在枯水年，高温少雨使得冰川消融加强，可对河川径流有所补充；而在多雨低温的丰水年，大量的降水被储存于冰川，一定程度上又会减少河流的水量。黄河

源区的冰川主要分布于阿尼玛卿山脉，覆盖面积约为 125 km^2。在气温升高的影响下，黄河源区的冰川和积雪呈现出持续的退缩状态，其缩减面积远大于临近的长江源区。据统计，黄河源区的冰川萎缩始于小冰期最盛期；自 20 世纪 60 年代至 2000年，源区冰川面积缩减达到 17%（约 0.5%/yr），缩减速率约 10 倍于小冰期最盛期至 1966 年[6]。自 2000 年以后，黄河源区的冰川和积雪持续消融，引起所在区域的湖泊面积扩张、深度增大以及陆地水储量（terrestrial water storage，TWS）的增大[7-9]。尽管期间有个别冰川存在前进现象，但无法扭转整体的退缩趋势[10]。除了冰川之外，融雪也是高寒山区径流的来源之一。除了增加河川径流量之外，融雪还能改变径流的年内分配，进而影响中下游的水资源调配。黄河源区的积雪主要分布在巴颜喀拉山主峰的周边地区，年最大积雪深度约为 140—250 mm。近 40 年来，由于降水的增多，黄河源区冬季和春季累积积雪增加了 60.18%，但变化较为平缓，幅度不大。自 20 世纪 60 年代开始，黄河源区的融雪时间在升温的影响下不断提前，使得春季径流增加，夏季径流减少，年总河川径流量显著减少[11]。春季径流的增多使得径流提前进入河道和水库，一方面增大 ET 损耗，另一方面使得中下游水库在春季的蓄水压力增大。为防御汛期夏季洪水，黄河源区中下游水库（如龙羊峡水库等）会在春季进行放水，这就导致提前融化的水量因风险规避而被放走，间接造成水资源的浪费。此外，有研究表明，黄河源区的冰川和积雪消融导致扎陵湖和鄂陵湖的湖面增加会产生湖泊效应，与局地对流降水存在一定的正反馈效应，但受限于研究时段和假设前提，该结论尚存在一定的不确定性[12]。总体而言，尽管黄河源区冰川积雪的融化会在某些时间段增加径流，但同时也会增加损耗（增加的 ET 和水库放水），这使得径流增加的总量非常有限，并且在长时间尺度上，靠冰川积雪的消融来补充水资源显而易见是不可持续的。黄河源区的地理条件和脆弱生态使得该区域积雪冰川的观测和模拟的难度较大，冰川积雪水文过程与陆面生态和区域气候的相互作用机制也非常复杂。因此，如何借助当前先进的空天地一体遥感技术对该区域加强监测，为冰川积雪及其变化的分析和数值模拟提供对比和验证的依据，是未来黄河源区水循环研究的重要课题。

（3）冻土层的退化是黄河源区气温升高所导致的另一显著变化。在黄河源区存在着区域性的多年永久冻土和季节性冻土。自20 世纪 80 年代以来，受气候升温和人类活动的影响，黄河源区的冻土发生了区域性的退化，主要表现为冻土深度的减小、地下水的升温、永久冻土层向季节性冻土的转变[13,14]。冻土退化可加速高寒山区生态环境的恶化，也能够改变地表的能量水分收支，对区域水循环和气候有重要的反馈。目前，针对黄河源区冻土的变化已开展有一定程度的研究，但结论尚存在较大的不确定性。例如，马帅等[15]发现，1972—2012 年黄河源区多年冻土只有少部分发生退化，退化的冻土面积为 833 km^2；同时，针对未来情景 RCP 2.6、RCP 6.0 和 RCP 8.5②浓度路径下的研究结果表明，直至 2050 年，黄河源区多年冻土退化为季节冻土的面积差别并不大。而根据金会军等[13]的发现，从 20 世纪 80 年代以来，黄河源区气温以 0.02℃/yr 的速率持续上升，加上日益增强的人类经济活动，导致了源区冻土的区域性退化。其中，多年冻土下界普遍升高达 50—80 m，最大季节冻深平均减少 0.12 m，浅层地下水温度上升 0.5℃—0.7℃，气候变化对冻土产生了显著的影响。同样，黄荣辉和周德刚[16]研究发现，由于黄河源区 20 世纪 80—90 年代的明显升温，并持续到 21 世纪初，这使得黄河源区冻土的深度不断变浅，冻土上层位置不断下移，进而导致了多年冻土层

② 典型代表浓度路径（representative concentration pathway，RCP）。

变薄，甚至个别小范围的多年冻土层消失，而季节性冻土层变厚。受观测条件和现有数据积累的限制、数值模拟的难度及机理机制理解的不全面，目前对黄河源区气候变化影响下的冻土退化研究依然存在较大的不确定性，需在未来进行更加充分的监测、分析和验证。

基于黄河源区上述气候变化特征，一些综合评判指数和指标也被用于分析该地区的干湿变化，得到了许多具有参考价值的结果。例如，张艳芳等[17]指出，从归一化植被指数（NDVI）和标准化降水-蒸散指数（SPEI）来看，黄河源区 2000 年以来总体上均呈波动上升趋势，即植被覆盖状况略有好转，干旱程度有所降低，仅源区中部及诺尔盖生态区干旱程度略有加剧，黄河源区总体而言气象干旱呈现出缓解的趋势。任怡等[18]基于修正的地表水分供应指数，发现 2000—2013 年黄河上游源区段该指数由干旱逐渐转为正常偏湿润。Yang 等[19]基于多组帕尔默干旱强度指数（PDSI）的分析表明，黄河源区自 20 世纪 90 年代以来的气象和水文干旱均有缓解的迹象。尽管如此，正如前文所言，气象和水文干旱指标和指数所能够反映的干旱缓解，是否能够真正有效地改善黄河源区水资源状况，尚需进一步翔实的研究论证。

2 黄河源区河川径流量的变化

黄河源区的河川径流既是整个黄河流域水资源的最主要来源，也是黄河流域诸多水电站发电量的直接

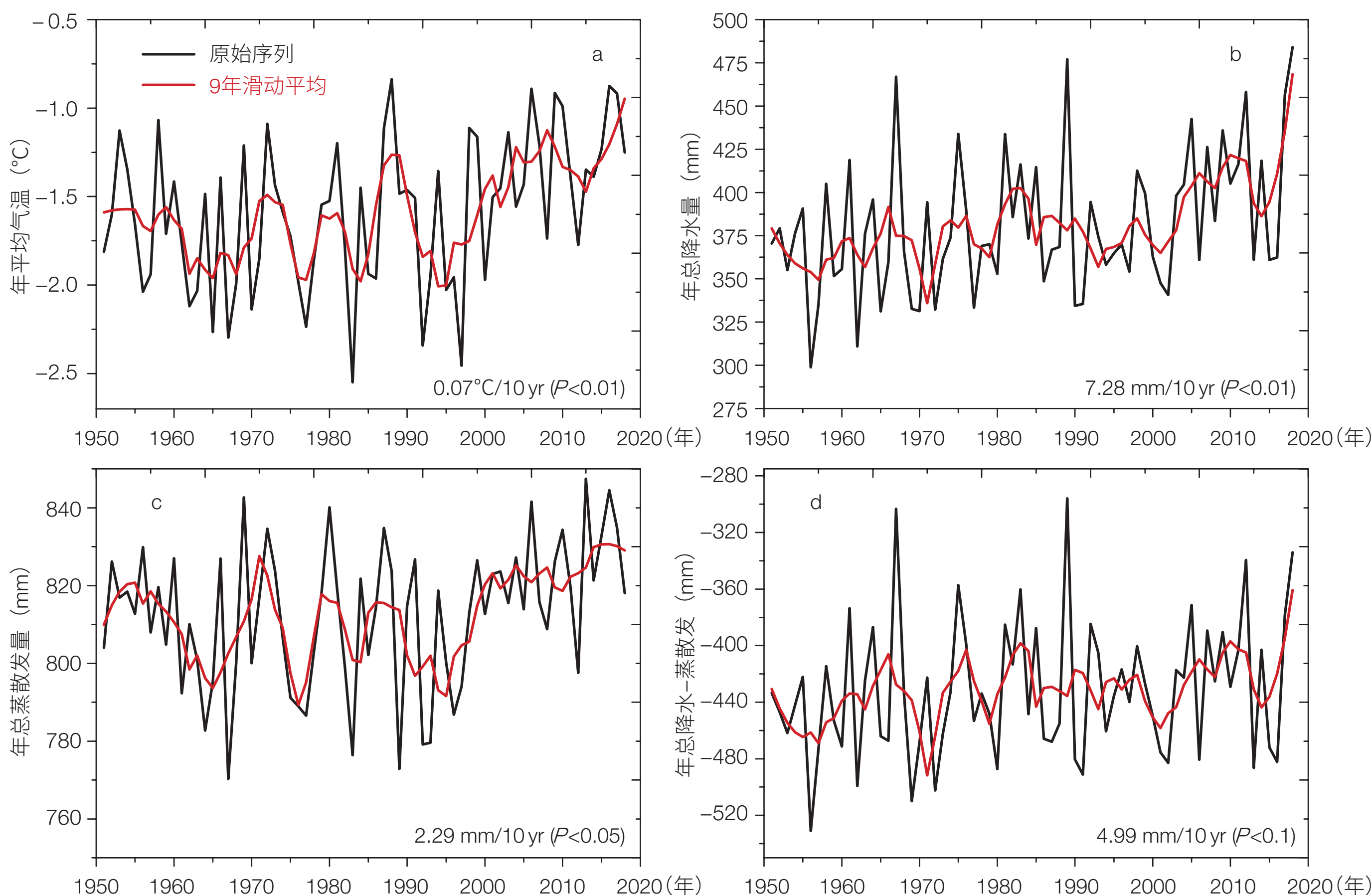


图 2　1951—2018 年黄河源区年平均气温（a）、年总降水量（b）、年总蒸散发量（c）及年总降水量-年总蒸散发量（d）的变化

数据来源：CRU TS4.01 ③

③ http://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/.

保障，其变化直接决定了黄河源区水资源状况的优劣，对我国北方的国民经济意义极其重大。然而，从径流量的角度来看，黄河源区近 50 多年的水资源状况不容乐观。自 20 世纪 60—90 年代，黄河源区的平均径流量的总体呈现出下降的趋势，尤其是重要水文观测站吉迈和唐乃亥的汛期径流量均表现为下降趋势，而非汛期的径流量有所上升，这与降水集中度的变化相一致[20]。进入 20 世纪 90 年代后，黄河源区的径流发生突变，表现为径流量的急剧减少[21]。据统计，在 1995 年之后，黄河源区甚至出现了断流的现象，并且次数不断增多，范围和持续时间也不断加大[22]。尽管相对应的，黄河源区 20 世纪 90 年代的降水也呈现出减少的趋势，并且在年代际尺度上，黄河流域的径流基本由气候变化所决定[23]。但周德刚和黄荣辉[24]指出，该时间段径流的减少并不能完全用降水量和强度的变化来解释。从趋势上看，径流的减幅几乎 2 倍于降水的减幅，并且在时间上更加集中于汛期[25]。其主要原因是除了降水之外，气温及其决定的 ET 同样是影响径流的重要因子。张国宏等[26]的研究表明，在黄河源区，地表径流与气温的相关性要好于与降水量相关性。从图 3 可以看出，20 世纪 90 年代也是黄河源区气温与 ET 急剧增大的时期，并且由于降水的年内分配逐渐变得均匀，这进一步加剧了单位降水的 ET 损失，从而使得产流进一步减少。

从唐乃亥和兰州水文站 1956—2016 年天然和实测年径流量的对比来看，黄河源区唐乃亥站以上集水区天然和实测径流量几乎相同。该区间内人类取用水较少，龙羊峡水库以上基本无水利水电工程，人类活动的影响基本可以忽略不计；而在兰州站以上集水区天然和实测径流量对比来看，两者已经显现出一定的差别，尤其是 20 世纪 80 年代中后期以来，实测径流量明显低于天然径流量。1956—2016 年，兰州站以上集水区天然和实测径流量均呈现出减少的趋势，其中天然径流量减少趋势为 0.84×10^8 m^3/yr，而实测径流量减少趋势则为 1.16×10^8 m^3/yr，高于天然径流量的减幅。以上分析表明，作为水资源的最直接来源，黄河源区的河川径流量正在气候变化和人类活动的共同影响下不断减少，水资源状况面临着巨大的压力和挑战。

3 黄河源区陆地水储量的变化

TWS 代表了区域内所有形式的水分总和，是综合表征地表、地下、植被、冰雪和土壤水的重要指标。2002 年美国与德国联合发起的 GRACE（Gravity Recovery and Climate Experiment）计划试验，利用地球重力场的变化来反演陆地水储量的变化，用以分析区域水分平衡及收支，在全球不同流域取得了空前的成功。对于黄河源区而言，在 GRACE 卫星 TWS 数据所能覆盖的 2002—2015 年，TWS 呈现出显著增加的

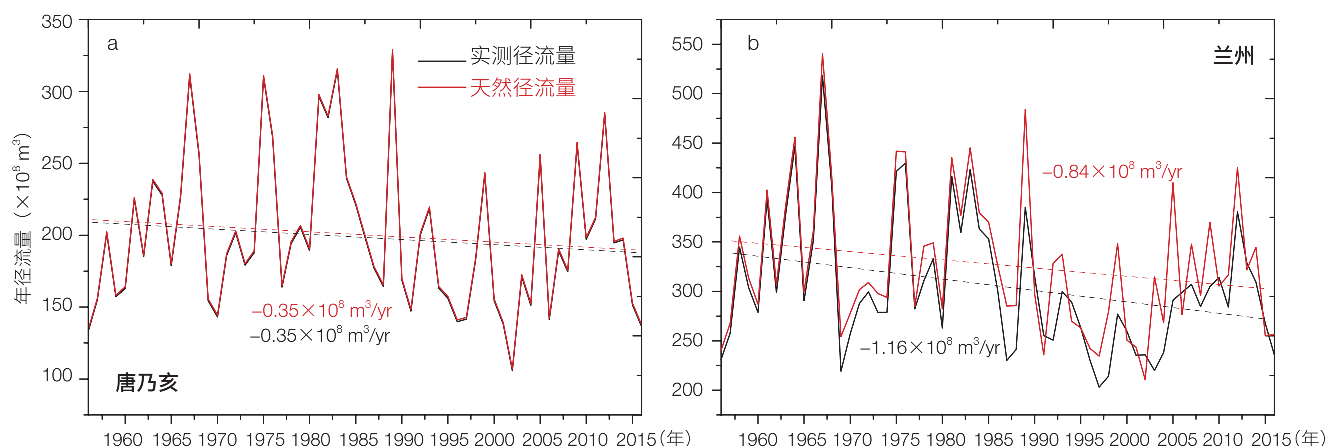


图 3 1956—2016 年唐乃亥站（a）和兰州站（b）天然与实测年径流量

趋势（1.26 mm/yr，$P<0.03$），但增加的速度越来越慢；而兰州站下游区域的TWS呈明显减少趋势，且减少速度在加快（图4）[27]。造成该种现象的主要原因是黄河流域巨大的耗水量。黄河流域需为全国15%的耕地和12%的人口提供用水，这使得整个流域用水压力巨大，因而黄河流域已成为全国人均水资源最为匮乏的地区之一。由于上游和源区的来水有限并在不断减少，中下游地区的地下水因农业灌溉连年超采，已在华北地区形成了严重的地下水漏斗，致使源区下游的TWS呈现出下降趋势，这说明流域水资源的形势极其严峻。

在GRACE数据较为完备的2003—2015年，黄河源区降水量和蒸散发量均呈现不明显的减少趋势，但是地表蒸散发减少的速度超过降水量，即年总降水量–年总蒸散发量（P-ET）表现为增加的趋势。在该相应的时间段内，黄河源区河川径流量呈现不显著的增加趋势，但是其增速要快于P-ET，其中极有可能是融雪在径流增加中起到了积极的作用。

4 黄河源区植被覆盖的变化

草地是黄河源区地表最重要的植被覆盖，占整个源区面积比重高达80%[28]。在气候变化的影响下，地表覆盖能够通过有效改变影响地表的水分、能量和辐射的分配及平衡，进而影响水文过程、水热循环和区域气候。地表植被覆盖的退化能引发水土流失、土地沙漠化、冰川退缩、冻土退化湖泊萎缩、生态恶化及碳汇丧失等一系列严重的后果[13,28,29]，因此黄河源区的草地退化一直以来是地学研究关注的焦点之一。

众多的研究表明，与20世纪50年代相比，草地退化是黄河源区近30年来最主要的土地利用/覆盖变化（Land Use/Cover Change，LUCC）的主要特征，具体表现为草地面积减小、草场质量下降和荒漠化土地面积的增加[28-32]。源区草地退化的空间特征主要表现为草地的斑块化、破碎化和分散化；20世纪70年代—2004年草地持续退化，而2004年之后由于源区进入暖湿周期，加上生态建设工程等举措的实施，草地覆盖状况有所好转[33]。以黄河源区草地退化状况最严重的两个县——达日县和玛多县为例：20世纪70年代中期—2000年，达日县发生退化的草地总面积约占全县面积的29.39%；玛多县约有70%的天然草场面积发生退化，其中大部分为重度退化[28,34,35]，这说明过去30年间黄河源区的草地退化程度是非常严重的（图5）。除了源区自身变化比较之外，与长江和澜沧江源区相比，黄河源区的LUCC同样有着较大的变

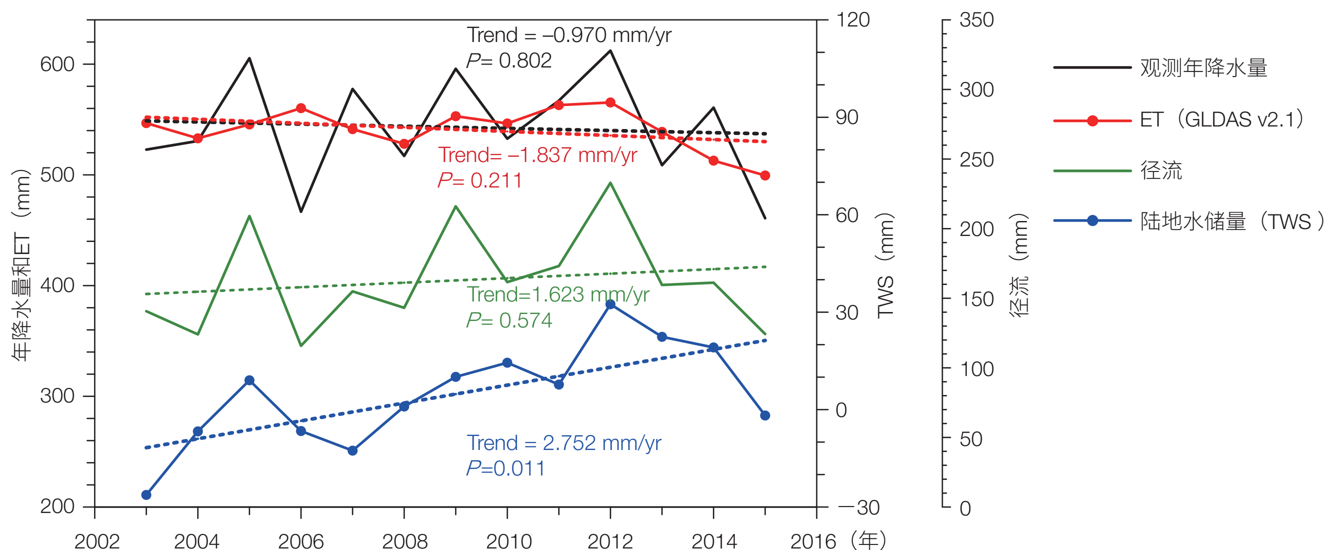


图4 2002—2015年黄河源区水循环主要变量的变化趋势[27]

化幅度。邵全琴等[33]通过不同土地覆盖指标对比三江源地区的 LUCC 进行对比评估的结果表明，无论是植被覆盖减少期还是增多期，多个指标都显示出，相比长江源和澜沧江源，黄河源区是三江源地区地表覆盖变化最明显、最剧烈的区域。这说明除了气候变化导致的源区降水和蒸发量的变化之外，由于地表下垫面改变等因素改变源区水热平衡，从而影响径流量的作用同样不容忽视。草地退化导致黄河源区植被覆盖率不断降低，生态环境不断恶化，土壤的水分涵养能力日益薄弱，土地出现有沙化的趋势，从而影响源区的综合水源涵养功能，地下水位降低，进一步使得产流减少，水资源状况恶化，这将直接威胁到源区的水土保持及中下游地区的生态环境和用水安全。因此，黄河源区的草地退化不仅是一个环境问题，更是一个严峻的社会经济问题。

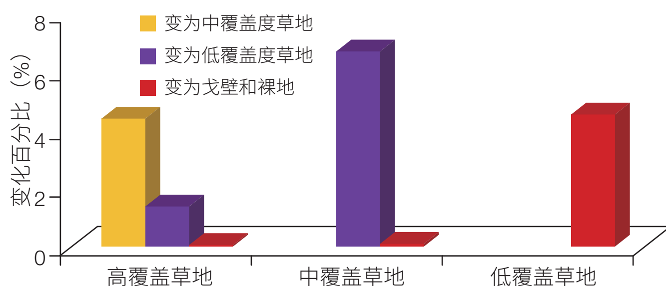


图 5　1970—2008 年黄河源区草地退化状况[29]

数据来源：中国科学院资源环境科学数据中心的全国土地利用数据④

5 黄河源区水资源利用及生态保护的对策及建议

习近平总书记在讲话中指出，新中国成立后，党和国家领导人民在治理开发黄河方面开展了大规模的工作，尤其是十八大以来，党中央着眼于生态文明建设全局，在水沙治理、生态环境及发展水平上取得了巨大的成就[2]。然而，当前黄河流域的发展现状却不容乐观，依然面临着突出的困难和问题：① 洪水风险依然是流域的最大威胁；② 流域生态环境脆弱；③ 水资源保障形势严峻；④ 发展质量有待提高。黄河源区对于整个黄河流域意义重大，黄河源区的生态环境能否进一步恢复，以及河川径流量能否维持并满足中下游巨大的用水需求是解决上述困难和问题的重中之重。根据习近平总书记针对保障黄河流域高质量发展提出的治理黄河流域 5 个方面的要求，黄河源区在当下和未来的发展规划中必须充分考虑、协调并解决好以下 4 个方面的问题。

（1）始终将黄河源区生态环境的保护放在首位。黄河流域的生态保护本身就是高质量发展的首要前提，必须在国家总体规划的基础上和严格制度的保障下，始终将其放在首位。事实上，面对黄河源区不断退化的生态和脆弱的环境，早在 2005 年，国务院便已批准了青海三江源自然保护区生态保护和建设总体规划，主要以退牧/退耕还草还林、恶化退化草场治理、水土保持等为主要任务和内容。目前，应在前期政策和规划的基础上，进一步细化具体规则并强化执行力度，有效落实到具体的对策和措施。这些措施主要包括：合理利用天然草场，加强保护，防止天然草地进一步退化；在合理利用草地资源的基础上，积极有效地进行保护和恢复。根据草地的覆盖状况和退化现状，因地制宜，通过指定放牧区域、减少放牧强度，杜绝过度放牧，使植被逐渐恢复；必要时可适当采取围栏、封山、封滩育草等临时措施。在综合考量区域水分土壤条件的前提下，播种优良的牧草品种，使退化草地和部分裸地尽快恢复生机，保证黄河源生态环境与人类活动和谐有序地共存。

（2）严格保障黄河源区河川径流和水资源的有序开发利用。河川径流和水资源是制约地区发展水平和上限的决定性因素。黄河源区是黄河流域的主要产水区，要实现流域的高质量、可持续发展，必

④ http://www.resdc.cn/.

须从根本上改善黄河源区的水环境，实现水资源的可持续利用。① 黄河源区需要在保护生态环境的基础上，进一步加强水土保持，以提高区域水资源的承载力。② 在源头地区要科学实施水资源综合管理，严格控制用水总量和效率；调整源区农业种植结构，规范种植模式，适当压缩种植规模；合理规划黄河源区的发展规模、承载人口和上游水电建设设施的开发规模，推广节水措施和高效率灌溉技术（喷灌及渠系改造等）；杜绝围湖造田等侵占水体的不合理生产行为，严格禁止重工业、高耗水和重污染产业，并在条件具备时，配合生态环境保护进行地下水的适当回补等补救措施。③ 需要从制度上增强政府水资源管理职能和能力建设，制定完善相关的法律条例，以最大程度减轻气候变化和人类取用水对黄河源区水资源的负面影响，降低水安全风险，努力探索水资源分配的优化方案，实现水资源的有序开发利用。

（3）从整体和全局的角度，充分协调黄河源区内农、林、牧和自然生态的和谐共存。黄河源区地处生态较为脆弱的高寒地区。要想从根本上解决当前气候变暖、草地退化、水土流失以及日益频繁的人类活动所造成的生态平衡遭破坏，切实保护黄河的生态，必须站在整体和全局的角度和高度，视整个黄河源区的气候、陆面、冰川、水文、土壤及人类等组成因子为一个有机整体，并以此高度和视角为出发点和落脚点进行区域规划、政策法规制定，进而指导对策、措施的执行和评估。必须协调平衡好自然生态和人类活动、经济效益和生态效益、社会发展和环境保护、本区域发展和中下游地区保障之间的关系；要站在科学的角度，合理布局源区内农业、林业、畜牧业、人类居住区和自然保护区，实现人类与自然的和谐共存，保障流域高质量发展所必不可少的自然条件和人文社会环境。

（4）将有效应对、有序适应黄河源区的气候变化提升到战略的高度。气候变化是黄河源区生态环境和水文循环变化的主要驱动因子，主导着区域降水、蒸散发及径流的发展变化，也决定着流域在较大空间尺度和较长时间尺度上的旱涝转变。尽管进入 21 世纪以来，中央和地方政府在治理黄河源区生态方面已投入了巨大的人力、物力和财力，但收效依然较为有限，其重要原因是未能足够重视气候变化对源区生态水文过程的决定性作用。因此，为有效配合黄河流域生态保护和高质量发展这个重大国家战略，在不断加强气候变化研究力度、拓展研究深度和广度的同时，必须把气候变化提升到黄河源区管理、治理和规划的战略性高度，并以此为依据和前提来制定应对和适应策略。倡导实施有序适应气候变化，既要充分发挥主观能动性，全力应对和减缓气候变化及其对生态和水资源带来的不利影响，又要尊重自然规律，适应气候因素中不可避免的变化，从而使得保护与治理双管齐下，充分贯彻“生态优先、绿色发展”的理念，保障黄河源区乃至黄河全流域的长治久安和高质量发展，使黄河真正成为造福社会和人民的幸福河。

致谢 本文得到黄河勘测规划设计有限公司彭少明提供的黄河源区天然/实测径流量相关数据。

参考文献

1 陈利群, 刘昌明. 黄河源区气候和土地覆被变化对径流的影响. 中国环境科学, 2007, 27(4): 559-565.

2 习近平. 在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话. 求是, 2019, (20): 1-5.

3 Hu Y, Maskey S, Uhlenbrook S, et al. Streamflow trends and climate linkages in the source region of the Yellow River, China. Hydrological Processes, 2011, 25(22): 3399-3411.

4 Liu Q, Cui B. Impacts of climate change/variability on the streamflow in the Yellow River Basin, China. Ecological Modelling, 2011, 222(2): 268-274.

5 马雪宁, 张明军, 黄小燕, 等. 黄河上游流域近49a气候变

化特征和未来变化趋势分析. 干旱区资源与环境, 2012, 26(6): 17-23.

6 杨建平, 丁永建, 刘时银, 等. 长江黄河源区冰川变化及其对河川径流的影响. 自然资源学报, 2003, 18(5): 595-602.

7 Zhang G, Xie H, Kang S, et al. Monitoring lake level changes on the Tibetan Plateau using ICESat altimetry data (2003-2009). Remote Sensing of Environment, 2011, 115(7): 1733-1742.

8 Long D, Pan Y, Zhou J, et al. Global analysis of spatiotemporal variability in merged total water storage changes using multiple GRACE products and global hydrological models. Remote Sensing of Environment, 2017, 192: 198-216.

9 Rodell M, Famiglietti J S, Wiese D N, et al. Emerging trends in global freshwater availability. Nature, 2018, 557: 651-659.

10 蒋宗立, 刘时银, 郭万钦, 等. 黄河源区阿尼玛卿山典型冰川表面高程近期变化. 冰川冻土, 2018, 40(2): 231-237.

11 吕爱锋, 贾绍凤, 燕华云, 等. 三江源地区融雪径流时间变化特征与趋势分析. 资源科学, 2009, 31(10): 76-81.

12 Wen L, Lv S, Li Z, et al. Impacts of the two biggest lakes on local temperature and precipitation in the Yellow River Source Region of the Tibetan Plateau. Advances in Meteorology, 2015, DOI: SUN:HYFW.0.2015-03-025.

13 金会军, 王绍令, 吕兰芝, 等. 黄河源区冻土特征及退化趋势. 冰川冻土, 2010, 32(1): 10-17.

14 文军, 蓝永超, 苏中波, 等. 黄河源区陆面过程观测和模拟研究进展. 地球科学进展, 2011, 26(6): 575-585.

15 马帅, 盛煜, 曹伟, 等. 黄河源区多年冻土空间分布变化特征数值模拟. 地理学报, 2017, 72(9): 1621-1633.

16 黄荣辉, 周德刚. 气候变化对黄河径流以及源区生态和冻土环境的影响. 自然杂志, 2012, 34(1): 1-9.

17 张艳芳, 吴春玲, 张宏运, 等. 黄河源区植被指数与干旱指数时空变化特征. 山地学报, 2017, 35(2): 142-150.

18 任怡, 王义民, 畅建霞, 等. 基于多源指标信息的黄河流域干旱特征对比分析. 自然灾害学报, 2017, 26(4): 106-115.

19 Yang Q, Li M X, Zheng Z Y, et al. Regional applicability of seven meteorological drought indices in China. Science China Earth Sciences, 2017, 60: 745-760.

20 董晓辉, 姚治君, 陈传友. 黄河源区径流变化及其对降水的响应. 资源科学, 2007, 29(3): 67-73.

21 Zheng H, Zhang L, Liu C, et al. Changes in stream flow regime in headwater catchments of the Yellow River basin since the 1950s. Hydrological Processes, 2007, 21(7): 886-893.

22 谷源泽, 李庆金, 杨风栋, 等. 黄河源地区水文水资源及生态环境变化研究. 海洋湖沼通报, 2002, (1): 18-25.

23 马柱国. 黄河径流量的历史演变规律及成因. 地球物理学报, 2005, 48(6): 1270-1275.

24 周德刚, 黄荣辉. 黄河源区水文收支对近代气候变化的响应. 科学通报, 2012, 57(15): 1345-1352.

25 张士锋, 贾绍凤. 降水不均匀性对黄河天然径流量的影响. 地理科学进展, 2001, 20(4): 355-363.

26 张国宏, 王晓丽, 郭慕萍, 等. 近60a黄河流域地表径流变化特征及其与气候变化的关系. 干旱区资源与环境, 2013, 27(7): 91-95.

27 Lv, M X, Ma Z G, Li M X, et al. Quantitative analysis of terrestrial water storage changes under the Grain for Green program in the Yellow River basin. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2019, 124: 1336-1351.

28 张镱锂, 刘林山, 摆万奇, 等. 黄河源地区草地退化空间特征. 地理学报, 2006, 61(1): 3-14.

29 郝龙飞, 邵全琴, 刘纪远, 等. 近30年黄河源头土地覆被变化特征分析. 地球信息科学学报, 2011, 13(3): 289-296.

30 潘竟虎, 刘菊玲. 黄河源区土地利用和景观格局变化及其生态环境效应. 干旱区资源与环境, 2005, 19(4): 69-74.

31 郗妍飞, 颜长珍, 宋翔, 等. 近30a黄河源地区荒漠遥感动态监测. 中国沙漠, 2008, 28(3): 405-409.

32 杨一鹏, 郭浠, 黄琦, 等. 黄河源头地区土地覆盖的时空变化特征. 生态科学, 2013, 32(1): 98-103.

33 邵全琴, 赵志平, 刘纪远, 等. 近30年来三江源地区土地

覆被与宏观生态变化特征. 地理研究, 2010, 29(8): 1439-1451.

34 杜继稳, 梁生俊, 胡春娟, 等. 植被覆盖变化对区域气候影响的数值模拟研究进展. 西北林学院学报, 2001, 16(2): 22-27.

35 刘纪远, 徐新良, 邵全琴. 近30年来青海三江源地区草地退化的时空特征. 地理学报, 2008, 63(4): 364-376.

Climate, Hydrology, and Vegetation Coverage Changes in Source Region of Yellow River and Countermeasures for Challenges

ZHENG Ziyan[1] LV Meixia[1] MA Zhuguo[1,2*]

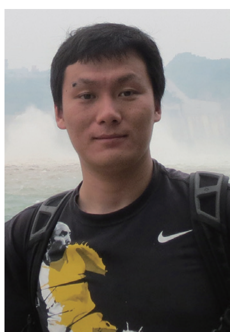
（1 Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China）

Abstract The source region of Yellow River is the most important water source and in contributing more than 37% of the total streamflow of the whole Yellow River, which makes great significance for water resources security, food production, and the ecological environment in the lower reaches of the river. Clarifying the changes in climatic hydrology and vegetation coverage, especially grassland degradation in the source region of Yellow River is not only a prerequisite for a deep understanding of the hydrological cycle mechanism of this region, but also an accurate grasp of the water resources and ecological environment in the source region and in the middle and lower reaches. Moreover, it is the core issue of implementing the requirements of President Xi Jinping's "ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin". According to the meteorological datasets, the source region of Yellow River has experienced a significant warming and wetting process since 1951, and has declined in the 1990s, but the temperature and precipitation have increased at a faster rate since 2000, which has led to the melting of glacial and snow, the increased evapotranspiration, and shrinkage of frozen soil. However, due to the intensification of water loss in various processes and the impact of human activities, this humidification cannot be converted into effective water resources, and the observed and natural streamflow have shown decreasing trends. Moreover, the continuously degraded grassland has continuously reduced the regional water conservation capacity and the ecological environment has continued to deteriorate. Facing the severe water resources and ecological environment challenges of the source region of Yellow River, we recommend that (1) ecological environmental protection be given priority; (2) the orderly development and utilization of water resources; (3) the harmonious coexistence of social production and the natural environment; and (4) the implementation of an orderly adaptation to climate change as a strategic perspective.

Keyword source region of Yellow River, climate change, water resources, vegetation coverage, countermeasures

* Corresponding author



郑子彦 中国科学院东亚区域气候-环境重点实验室助理研究员。主要从事流域水文循环分析、陆面过程模拟和区域“大气-水文”耦合数值模拟方面的研究。主持国家自然科学基金青年科学基金、北京市自然科学基金青年基金、国家重点研发计划子课题各1项。完成和发表学术论文20篇。2014年获第12届中国水论坛优秀青年论文奖。

E-mail: zhengzy@tea.ac.cn

ZHENG Ziyan Assistant researcher in the Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Chinese Academy of Sciences (CAS). His research interests are mainly engaged in the hydrological cycle analysis, land surface simulation, and regional “atmosphere-hydrology” coupled modeling. He presided over the National Natural Science Foundation of China (Young Scientists Fund), Youth Fund of Natural Science Foundation of Beijing Municipality, and sub-projects of National Key Research and Development Program of China. Now he has completed and published 20 academic papers. In 2014, he won the Outstanding Youth Paper Award of the 12th China Water Forum. E-mail: zhengzy@tea.ac.cn



马柱国 中国科学院特聘研究员，中国科学院大学岗位教授。中国科学院东亚区域气候-环境重点实验室主任，全球变化国家重大研究计划“973”项目首席科学家（2012—2016年），国家重点研发计划《全球变化及应对》项目首席科学家（2016—2021年），国家自然科学基金重点项目负责人（2016—2020年）。研究兴趣集中在区域气候的分析及模拟、区域模式的发展和应用、地表水分过程对气候变化的影响、干旱化的检测和形成机理、城市化对气候变化影响等方面。兼任中国科学院和教育部多个重点实验室学术委员会委员及多个期刊编委。发表论文共计130余篇，其中SCI论文70余篇，参与和与他人合作著作3部。曾获科学技术部重大基础研究计划“973”项目先进个人及省部级奖3次。

E-mail: mazg@tea.ac.cn

MA Zhuguo Researcher/Ph.D. Tutor, specially-appointed researcher of Chinese Academy of Sciences (CAS) / Post Professor of the University of Chinese Academy of Sciences. Currently, he serves as the director of the Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, CAS. He is the chief scientist of the National Major Research Program (973 Program) project of global change (2012–2016), the National Key R&D Program of China (2016–2021), and the National Natural Science Foundation of China (2016–2020). His research interests focus on the analysis and simulation of regional climate, the development and application of regional models, the impact of surface moisture processes on climate change, the detection and formation mechanisms of global and regional drought, and the impact of urbanization on climate change. He is also a member of the academic committees of several key laboratories of CAS and the Ministry of Education, and the editorial board of many journals such as *Atmospheric Sciences*. He has completed and published more than 130 papers, including more than 70 SCI-indexed papers, and participated in and collaborated with others for 3 books. In 2004, he was awarded the advanced individual of the 973 Program of the Ministry of Science and Technology's major basic research plan, and won the provincial and ministerial awards 3 times. E-mail: mazg@tea.ac.cn

■责任编辑：岳凌生

参考文献（双语版）

1 陈利群, 刘昌明. 黄河源区气候和土地覆被变化对径流的影响. 中国环境科学, 2007, 27(4): 559-565.
Chen L Q, Liu C M. Influence of climate and land-cover change on runoff of the source regions of Yellow River. China Environmental Science, 2007, 27(4): 559-565. (in Chinese)

2 习近平. 在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话. 求是, 2019, (20): 1-5.
Xi J P. President Xi Jinping stresses ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin. Qiushi, 2019, (20): 1-5. (in Chinese)

3 Hu Y, Maskey S, Uhlenbrook S, et al. Streamflow trends and climate linkages in the source region of the Yellow River, China. Hydrological Processes, 2011, 25(22): 3399-3411.

4 Liu Q, Cui B. Impacts of climate change/variability on the streamflow in the Yellow River Basin, China. Ecological Modelling, 2011, 222(2): 268-274.

5 马雪宁, 张明军, 黄小燕, 等. 黄河上游流域近49a气候变化特征和未来变化趋势分析. 干旱区资源与环境, 2012, 26(6): 17-23.
Ma X N, Zhang M J, Huang X Y, et al. Characteristics of climate change and future trend in the upper Yellow River Basin from 1960 to 2008. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(6): 17-23. (in Chinese)

6 杨建平, 丁永建, 刘时银, 等. 长江黄河源区冰川变化及其对河川径流的影响. 自然资源学报, 2003, 18(5): 595-602.
Yang J P, Ding Y J, Liu S Y, et al. Glacier change and its effect on surface runoff in the source regions of the Yangtze and Yellow rivers. Journal of Natural Resources, 2003, 18(5): 595-602. (in Chinese)

7 Zhang G, Xie H, Kang S, et al. Monitoring lake level changes on the Tibetan Plateau using ICESat altimetry data (2003-2009). Remote Sensing of Environment, 2011, 115(7): 1733-1742.

8 Long D, Pan Y, Zhou J, et al. Global analysis of spatiotemporal variability in merged total water storage changes using multiple GRACE products and global hydrological models. Remote Sensing of Environment, 2017, 192: 198-216.

9 Rodell M, Famiglietti J S, Wiese D N, et al. Emerging trends in global freshwater availability. Nature, 2018, 557: 651-659.

10 蒋宗立, 刘时银, 郭万钦, 等. 黄河源区阿尼玛卿山典型冰川表面高程近期变化. 冰川冻土, 2018, 40(2): 231-237.
Jiang Z L, Liu S Y, Guo W Q, et al. Recent surface elevation changes of three representative glaciers in Ányêmaqên Mountains, source region of Yellow River. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(2): 231-237. (in Chinese)

11 吕爱锋, 贾绍凤, 燕华云, 等. 三江源地区融雪径流时间变化特征与趋势分析. 资源科学, 2009, 31(10): 76-81.
Lyu A F, Jia S F, Yan H Y, et al. Temporal variations and trend analysis of the snowmelt runoff timing across the source regions of the Yangtze River,Yellow River and Lancang River. Resources Science, 2009, 31(10): 76-81. (in Chinese)

12 Wen L, Lv S, Li Z, et al. Impacts of the two biggest lakes on local temperature and precipitation in the Yellow River Source Region of the Tibetan Plateau. Advances in Meteorology, 2015, DOI: SUN:HYFW.0.2015-03-025.

13 金会军, 王绍令, 吕兰芝, 等. 黄河源区冻土特征及退化趋势. 冰川冻土, 2010, 32(1): 10-17.
Jin H J, Wang S L, Lyu L Z, et al. Features and degradation of frozen ground in the sources area of the Yellow River, China. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(1): 10-17. (in Chinese)

14 文军, 蓝永超, 苏中波, 等. 黄河源区陆面过程观测和模拟研究进展. 地球科学进展, 2011, 26(6): 575-585.
Wen J, Lan Y C, Su Z B, et al. Advances in observation and modeling of land surface processes over the source region of

the Yellow River. Advances in Earth Science, 2011, 26(6): 575-585. (in Chinese)

15 马帅, 盛煜, 曹伟, 等. 黄河源区多年冻土空间分布变化特征数值模拟. 地理学报, 2017, 72(9): 1621-1633.

Ma S, Sheng Y, Cao W, et al. Numerical simulation of spatial distribution and change of permafrost in the source area of the Yellow River. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(9): 1621-1633. (in Chinese)

16 黄荣辉, 周德刚. 气候变化对黄河径流以及源区生态和冻土环境的影响. 自然杂志, 2012, 34(1): 1-9.

Huang R H, Zhou D G. The impact of climate change on the runoff of the Yellow River and ecosystem and frozen soil in its source area. Chinese Journal of Nature, 2012, 34(1): 1-9. (in Chinese)

17 张艳芳, 吴春玲, 张宏运, 等. 黄河源区植被指数与干旱指数时空变化特征. 山地学报, 2017, 35(2): 142-150.

Zhang Y F, Wu C L, Zhang H Y, et al. Dependency relationship between NDVI and SPEI for spatial-temporal variations in the source areas of the Yellow River. Mountain Research, 2017, 35(2): 142-150. (in Chinese)

18 任怡, 王义民, 畅建霞, 等. 基于多源指标信息的黄河流域干旱特征对比分析. 自然灾害学报, 2017, 26(4): 106-115.

Ren Y, Wang Y M, Chang J X, et al. Drought characteristics analysis of the Yellow River Basin based on the index of multi-source information. Journal of Natural Disasters, 2017, 26(4): 106-115. (in Chinese)

19 Yang Q, Li M X, Zheng Z Y, et al. Regional applicability of seven meteorological drought indices in China. Science China Earth Sciences, 2017, 60: 745-760.

20 董晓辉, 姚治君, 陈传友. 黄河源区径流变化及其对降水的响应. 资源科学, 2007, 29(3): 67-73.

Dong X H, Yao Z J, Chen C Y. Runoff variation and responses to precipitation in the source regions of the Yellow River. Resources Science, 2007, 29(3): 67-73. (in Chinese)

21 Zheng H X, Zhang L, Liu C M, et al. Changes in stream flow regime in headwater catchments of the Yellow River Basin since the 1950s. Hydrological Processes, 2007, 21(7): 886-893.

22 谷源泽, 李庆金, 杨风栋, 等. 黄河源地区水文水资源及生态环境变化研究. 海洋湖沼通报, 2002, (1): 18-25.

Gu Y Z, Li Q J, Yang F D, et al. A study on the changes in hydrologic situation, water resources and ecological environment in the Yellow River source region. Transaction of Oceanology and Limnology, 2002, (1): 18-25. (in Chinese)

23 马柱国. 黄河径流量的历史演变规律及成因. 地球物理学报, 2005, 48(6): 1270-1275.

Ma Z G. Historical regular patterns of the discharge in the Yellow River and the cause of their formation. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(6): 1270-1275. (in Chinese)

24 周德刚, 黄荣辉. 黄河源区水文收支对近代气候变化的响应. 科学通报, 2012, 57(15): 1345-1352.

Zhou D G, Huang R H. Response of water budget to recent climatic changes in the source region of the Yellow River. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(15): 1345-1352. (in Chinese)

25 张士锋, 贾绍凤. 降水不均匀性对黄河天然径流量的影响. 地理科学进展, 2001, 20(4): 355-363.

Zhang S F, Jia S F. A research of the impacts of uneven precipitation on the natural runoff in the Yellow River. Progress in Geography, 2001, 20(4): 355-363. (in Chinese)

26 张国宏, 王晓丽, 郭慕萍, 等. 近60a黄河流域地表径流变化特征及其与气候变化的关系. 干旱区资源与环境, 2013, 27(7): 91-95.

Zhang G H, Wang X L, Guo M P, et al. The spatial and temporal structure of runoff variation and the climate background in the Yellow River Basin during the past 60 years. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(7): 91-95. (in Chinese)

27 Lv, M X, Ma Z G, Li M X, et al. Quantitative analysis of terrestrial water storage changes under the grain for green program in the Yellow River Basin. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2019, DOI: 2018JD029113.

28 张镱锂, 刘林山, 摆万奇, 等. 黄河源地区草地退化空间特征. 地理学报, 2006, 61(1): 3-14.
Zhang Y L, Liu L S, Bai W Q, et al. Grassland degradation in the source region of the Yellow River. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(1): 3-14. (in Chinese)

29 邴龙飞, 邵全琴, 刘纪远. 近30年黄河源头土地覆被变化特征分析. 地球信息科学学报, 2011, 13(3): 289-296.
Bing L F, Shao Q Q, Liu J Y. Characteristic of land cover changes in the Yellow River headwaters region over the past 30 years. Journal of Geo-Information Science, 2011, 13(3): 289-296. (in Chinese)

30 潘竟虎, 刘菊玲. 黄河源区土地利用和景观格局变化及其生态环境效应. 干旱区资源与环境, 2005, 19(4): 69-74.
Pan J H, Liu J L. Land use change and its impact in the eco-environment on the Yellow River source region during the past 15 years. Journal of Arid Land Resources & Environment, 2005, 19(4): 69-74. (in Chinese)

31 郄妍飞, 颜长珍, 宋翔, 等. 近30a黄河源地区荒漠遥感动态监测. 中国沙漠, 2008, 28(3): 405-409.
Qie Y F, Yan C Z, Song X, et al. Remote sensing monitoring on dynamics of desertified lands in the Yellow River source region in last 30 years. Journal of Desert Research, 2008, 28(3): 405-409. (in Chinese)

32 杨一鹏, 郭泺, 黄琦, 等. 黄河源头地区土地覆盖的时空变化特征. 生态科学, 2013, 32(1): 98-103.
Yang Y P, Guo L, Huang Q, et al. Temporal and spatial variation of land cover change in the source regions of the Yangtze and Yellow rivers. Ecological Science, 2013, 32(1): 98-103. (in Chinese)

33 邵全琴, 赵志平, 刘纪远, 等. 近30年来三江源地区土地覆被与宏观生态变化特征. 地理研究, 2010, 29(8): 1439-1451.
Shao Q Q, Zhao Z P, Liu J Y, et al. The characteristics of land cover and macroscopical ecology changes in the source region of three rivers on Qinghai-Tibet Plateau during last 30 years. Geographical Research, 2010, 29(8): 1439-1451. (in Chinese)

34 杜继稳, 梁生俊, 胡春娟, 等. 植被覆盖变化对区域气候影响的数值模拟研究进展. 西北林学院学报, 2001, 16(2): 22-27.
Du J W, Liang S J, Hu C J, et al. The modeling development of the influence of surface plant cover changes on regional climate. Journal of Northwest Forestry College, 2001, 16(2): 22-27. (in Chinese)

35 刘纪远, 徐新良, 邵全琴. 近30年来青海三江源地区草地退化的时空特征. 地理学报, 2008, 63(4): 364-376.
Liu J Y, Xu X L, Shao Q Q. The spatial and temporal characteristics of grassland degradation in the three-river headwaters region in Qinghai Province. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(4): 364-376. (in Chinese)